بهینه‌سازی هزینه انرژی با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم جامعهٔ مورچگان ★

محمود فتوحی [۱]   مسعود تابش [۲]

چکیده *هزینه‌های انرژی، درصد قابل توجهی از هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه‌های آبرسانی را تشکیل می‌دهند. مدیریت بهینهٔ این هزینه‌های انرژی برای تأمین آب مورد نیاز متقاضیان با کیفیت مطلوب اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. برای رسیدن به این مهم، بهینه‌سازی به‌عنوان ابزاری قدرتمند معرفی شده است. در این مقاله با معطوف شدن به فاز بهره‌برداری سعی می‌شود، بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد شبکه‌های آبرسانی با درنظر گرفتن هیدرولیک و کیفیت آب بررسی شود. در هر یک از این حالت‌ها، هدف اول حداقل ساختن هزینهٔ انرژی مصرفی و هدف دوم حداکثر نمودن قابلیت اطمینان هیدرولیکی، کیفی و یا تلفیقی می‌باشد؛ یعنی در عمل لازم است تا برنامهٔ کاری پمپ‌ها در طول یک دورهٔ زمانی بررسی عملکرد، مثلاً یک روز، به‌گونه‌ای تنظیم شود تا عمل پمپاژ، با تغییرات تقاضا در طول روز، تغییرکند و تا حد ممکن با این تغییرات منطبق گردد. در کنار این امر لازم است تا قابلیت اطمینان هیدرولیکی، کیفی و تلفیقی در شبکه نیز حداکثر گردد. در این مقاله، به‌منظور انطباق هر چه بیشتر حالت‌های عملکردی ایستگاه پمپاژ، از پمپ دور ثابت و دور متغیر استفاده می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی عملکردی شبکهٔ توزیع آب به‌علت کارایی بالا و سادگی پیاده‌سازی الگوریتم جامعهٔ مورچگان، الگوریتم NA-ACO-CD در محیط Visual C++ تدوین شده است. کارایی الگوریتم تدوین‌شده با بهینه‌سازی توابع ریاضی آزمایش و اثبات شده است و قابل اجرا بر روی شبکه‌های توزیع آب می‌باشد. روش پیشنهادی با استفاده از شبکه توزیع آب Anytown ارزیابی گردید و این نتیجه حاصل شد که نمی‌توان به ترکیبی از دور پمپ دست یافت که هر سه قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی و کیفی به‌طور همزمان بالا باشند.*

واژه‌های کلیدی بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم جامعه مورچگان، انرژی مصرفی، سن آب، قابلیت اطمینان.

Optimization of Energy Costs Considering Hydraulic and Quality Reliability Using Ant Colony Algorithm

M. Fotuhi   M. Tabesh

Abstract *Energy costs comprise considerable amount of operation costs in water distribution networks. Optimal management of energy costs to provide required water for consumers with desired quality is of high importance. To achieve this, optimization is defined as a powerful tool. In this paper, by focusing on operation phase, multi-objective optimization of water supply network considering hydraulic, quality and integrated reliability measures is performed. In each of these cases, the first goal is to minimize energy costs and maximization of each reliability measure is considered as the second objective. Therefore, it is necessary to set the performance schedule of the pumps over a period of time, one day, such a way that pumping schedual changes based on consumption variation during the day. In addition, it is required to maximize the hydraulic, quality and integrated reliability measures in the network. In this paper, in order to adapt more pump operating modes of pump station, both constant and variable speed pumps are used. In order to optimize performance of water distribution network, due to the high efficiency and simplicity of ant colony algorithm, the NA-ACO-CD (Non-Dominated Archiving Ant Colony Optimization with Crowd Distance) algorithm has been coded in Visual Studio C++. The efficiency of NA-ACO-CD algorithm is tested with mathematical functions and proved to be applicable on water distribution networks. The proposed method is evaluated on Anytown water distribution network and required pareto curved are produced. It is concluded that the methodology cannot be attained to a combination of pump speeds such that all three pump, hydraulic and quality reliabilities will be maximized simultaneously*.

Keywords Multi-objective optimization, Ant colony, Energy consumption, Water age, Reliability.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۷/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) استاد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

مقدمه

بالا رفتن سطح زندگی جوامع مختلف، منجر به افزایش نیاز بشر به آب و منابع انرژی شده است. هزینه‌های انرژی در شبکه‌های توزیع آب بخش زیادی از هزینه‌های شبکه را شامل می‌شود. بنابراین در سال‌های اخیر بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب به منظور کاهش هزینه‌ها از اهداف اصلی مهندسان و مدیران می‌باشد. پمپاژ آب بیشتر از حد مورد نیاز در شبکه‌های توزیع آب علاوه بر این‌که باعث مصرف بیش از اندازهٔ انرژی و افزایش هزینه‌های شبکه می‌گردد، باعث می‌شود فشارهای گرهی بیشتر از فشار مورد نیاز شود و این امر موجب افزایش نشت، شکست لوله‌ها و به تبع آن افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. از طرف دیگر در صورتی که ایستگاه پمپاژ به‌خصوص در ساعات پرمصرف نتواند آب کافی را به مصرف‌کننده برساند از نقاط ضعف آن به حساب می‌آید و از قابلیت اطمینان آن کاسته می‌شود. به‌علاوه، تغییر کارکرد پمپ می‌تواند سن آب در گره‌های شبکه را دستخوش تغییرات کند. سن آب یکی از عوامل مهم در کیفیت آب به‌شمار می‌آید، در واقع اگر زمان حرکت آب در لوله‌های شبکه و یا زمان ماند آب در مخازن بیشتر شود، سن آب در گره‌ها بیشتر و کیفیت آب بدتر می‌شود. با بیشتر شدن دبی پمپ به‌وسیلهٔ افزایش دور پمپ، سرعت در لوله‌ها زیاد شده و باعث می‌شود که سن آب در گره‌ها کمتر شده و کیفیت آب بهبود یابد.

از سوی دیگر مسائل مطرح در شبکه‌های توزیع آب غالباً بسیار پیچیده است به‌طوری که استفاده از روش‌های سنتی بهینه‌سازی در حل آنها مستلزم صرف زمان طولانی و حافظهٔ حجیم محاسباتی می‌باشد. این امر موجب کارایی بسیار اندک روش‌های سنتی گردیده است. الگوریتم‌های تکاملی که اغلب از طبیعت الهام گرفته شده‌اند، از روش‌های نوین بهینه‌سازی هستند که در سال‌های اخیر مطرح شده‌اند. قابلیت روش‌های تکاملی در حل مسائل پیچیده و بزرگ‌مقیاس باعث استفادهٔ روزافزون آنها در علوم مختلف شده است. در مسائلی که دارای ماهیت غیرخطی هستند و تعداد متغیرهای تصمیم زیادی در بهینه‌سازی موجود است، یافتن جواب‌های بهینهٔ مطلق با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی، مشکل و در مواقعی غیرممکن است. در چنین شرایطی روش‌های بر پایهٔ الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند نتایج مطلوبی ارائه دهد. برخی از روش‌های تکاملی بر پایهٔ جمعیتی از ذرات هوشمند است که در ارتباط با یکدیگر از خود رفتاری هوشمندانه نشان می‌دهند. هوش مصنوعی اعضای جمعیت سبب جهت‌دهی به حرکات آنها در فضای تصمیم به‌سوی جواب بهینه می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان نیز از روش‌های جدیدی است که با الهام از رفتار اجتماعی مورچگان در حال حرکت از لانه به‌سمت غذایشان ارائه گردیده است.

از سال ۱۹۷۰ تاکنون مطالعات زیادی در زمینهٔ بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپاژ صورت گرفته است. در تمامی این مطالعات سعی بر این است که برنامه‌ریزی پمپاژ با انجام آنالیز و مقایسه‌های کافی به ساعاتی با تعرفهٔ انرژی ارزانتر موکول گردد. برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ می‌تواند به‌طور ضمنی برحسب اجزای دیگر شبکه مثل ترازهای تانک [1] و یا به‌طور صریح توسط مشخص نمودن زمان روشن و خاموش بودن هر پمپ تعریف گردد [2]. یافتن برنامهٔ زمان‌بندی بهینهٔ عملکرد پمپاژ در شبکه‌های توزیع آب امری پیچیده برای محققان و مدیران می‌باشد. این پیچیدگی به‌سبب نوسانات مصرف آب، پیچیدگی شبکه‌های توزیع آب و تغییرات تعرفهٔ انرژی الکتریکی می‌باشد. کاهش هزینه‌های کل پمپاژ در سیستم‌های توزیع آب با راهکارهای مختلفی از قبیل نگهداری مناسب و بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. زمان‌بندی عملکرد پمپ‌ها می‌تواند تراکم پمپاژ را به ساعاتی با تعرفهٔ انرژی ارزان‌تر منتقل کند و درنتیجه هزینهٔ انرژی مصرف شده به‌وسیلهٔ پمپ‌ها کاهش می‌یابد. به‌علاوه، صرفه‌جویی در انرژی می‌تواند به‌وسیلهٔ پمپاژ آب در زمانی که تراز آب در تانک‌ها کمتر است و همین‌طور با استفاده از ترکیب پمپ‌های دارای راندمان متفاوت انجام گیرد [3].

با استفاده از پمپ دور متغیر می‌توان سرعت گردش پمپ را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که منحنی فشار سیستم بیشترین تطابق را با منحنی بازده داشته باشد[4]. هاشمی با استفاده از پمپ دور متغیر به بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های آبرسانی با هدف حداقل‌سازی انرژی مصرفی در عمل پمپاژ پرداخت [۵]. این محقق الگوریتم خود را بر پایهٔ الگوریتم مورچگان تدوین نموده و با نرم‌افزار شبیه‌سازی EPANET2 (مبتنی بر تقاضا) تلفیق کرده و با اعمال قید فشار، مشکلات این نوع تحلیل هیدرولیکی را برطرف نموده است.مهزاد در ادامهٔ تحقیق هاشمی [۵]، تابع تک‌هدفهٔ حداقل‌سازی هزینه‌های انرژی را به تابع دوهدفه تبدیل نمود که در آن هدف اول، کمینه کردن هزینه‌های انرژی و هدف دوم، بیشینه کردن قابلیت اطمینان ایستگاه پمپاژ بود [۶].

فرمانی و همکاران کاربرد الگوریتم تکاملی چندهدفه را در شناسایی تعامل بین هزینهٔ کل، قابلیت برگشت‌پذیری شبکهٔ (قابلیت اطمینان هیدرولیکی) و سن آب (کیفیت آب) در سیستم‌های توزیع آب بررسی کردند. آنها این کار را بر روی یک شبکهٔ واقعی مانند Anytown آزمایش کردند[7]. مینیمم کردن هزینه‌ها به‌عنوان یکی از اهداف بهینه‌سازی است که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری لوله‌ها، تانک‌ها و هزینهٔ فعلی انرژی مصرف‌شده درطول یک دورهٔ خاص می‌باشد. این هدف به‌تنهایی منجر به کاهش قطر لوله‌ها و ابعاد تأسیسات می‌شود که باعث ایجاد ظرفیت ناکافی برای اجزای شبکه می‌شود و می‌تواند شکست در لوله‌ها را بیشتر کند یا تأمین نیازها را مختل نماید. قابلیت برگشت‌پذیری ارائه‌شده توسط تودینی [8] به‌عنوان هدف دوم برای افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن آب به هنگام شکست لوله‌ها درنظر گرفته شده است. این شاخص به‌تنهایی باعث بزرگ‌تر شدن ابعاد اجزای شبکه می‌شود. این در حالی است که لوله‌های با قطر بزرگ و تانک‌های ذخیره با حجم زیاد، اثر منفی روی کیفیت آب می‌گذارند، چون باعث می‌شوند که سرعت جریان و جابه‌جایی آب کم شود. هدف دیگر در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های توزیع آب مینیمم کردن زمان ماند آب می‌باشد. زمان ماند نه تنها زمان ماند آب در تانک را شامل می‌شود، بلکه زمان حرکت آب قبل و بعد از ورودی آب به تأسیسات ذخیره را هم شامل می‌گردد. برای برآورد این شاخص از قابلیت نرم‌افزار EPANET2 استفاده شده است. اعمال این شاخص

به‌تنهایی نیز باعث می‌شود که ابعاد اجزای شبکه کوچک‌تر شود که در تقابل با شاخص قبلی می‌باشد. متغیرهای تصمیم شامل تصمیم بازسازی لوله‌ها، ابعاد تانک‌ها، محل تانک‌ها و برنامهٔ زمان‌بندی پمپاژ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مدل فوق قادر است تعامل خوبی بین اهداف مدل‌سازی شامل هزینهٔ کل شبکه، شاخص برگشت‌پذیری و سن آب برقرار نماید. طراحی شبکه به این شکل منجر به یک شبکه با قابلیت بالا می‌شود

به‌طوری‌که شبکهٔ به‌دست آمده، دارای لوله‌های بهینه و بهترین چیدمان برای تانک‌ها در نقاط پر مصرف می‌باشد. این نحوه طراحی باعث می‌شود که به‌طور خودکار ابعاد لوله‌ها کاهش یابد، قابلیت اطمینان شبکه افزایش یابد و سن آب در داخل شبکه نیز حداقل شود. اعمال برنامهٔ زمان‌بندی پمپاژ نیز منجر به این شده است که تمامی سه تانک موجود در شبکه در طول دوره‌های با تقاضای کم پر شود و برای دوره‌هایی که در آن مصرف حداکثر است نیز پر باقی بماند. از این‌رو در حالت شکست پمپ‌ها در شبکه، تانک‌ها پر خواهند بود و می‌توانند تقاضای شبکه را تأمین نمایند. این موضوع قابلیت اطمینان شبکه را به‌خوبی افزایش می‌دهد.

در این پژوهش با درنظر گرفتن پمپ دور متغیر و مقایسه آن با پمپ دور ثابت، تأثیر تغییر انرژی برروی عملکرد پمپ، هیدرولیک و سن آب شبکه بررسی می‌شود. در مطالعات قبلی هم‌چون پژوهش مهزاد [۶] اگرچه پمپ دورمتغیر درنظر گرفته شده است، ولی اثر آن فقط بر روی هیدرولیک شبکه بررسی شده است و سن آب در مطالعهٔ ایشان لحاظ نشده است. در مطالعهٔ

فرمانی و همکاران [7] هم هرچند که هیدرولیک و سن آب شبکه مدنظر قرار گرفته است، ولی نوع پمپ دور ثابت می‌باشد. با این توضیحات، هدف این تحقیق بهینه‌سازی عملکرد پمپ در فاز بهره‌برداری می‌باشد به‌گونه‌ای که هزینه‌های انرژی کمینه شود و قابلیت اطمینان پمپ، قابلیت اطمینان هیدرولیکی (فشار در گره‌ها)، قابلیت اطمینان سن آب و قابلیت اطمینان تلفیقی (ترکیب قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی و سن آب) بیشینه گردد.

مدل هیدرولیکی و کیفی(سن آب) شبکه

در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی هدف طراح آن است که با توجه به مشخصات شبکه، از مقادیر دبی لوله‌ها، فشار در گره‌ها و سایر مجهولات اطلاع داشته باشد. در بسیاری از تحلیل‌های هیدرولیکی، دبی‌های خروجی از گره‌ها بدون توجه به فشار آنها مقداری ثابت فرض می‌شود. به این روش، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا گفته می‌شود که اکثر نرم‌افزارهای کامپیوتری موجود برای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آب بر مبنای آن عمل می‌نمایند. در شرایط نرمال و در حالتی که فشار موجود در گره‌ها از فشار حداقل مجاز بیشتر شود، این روش مناسب و کارا می‌باشد، اما اگر در شرایط غیرنرمال شبکه با این روش تحلیل شود، ممکن است فشارهای گره‌ای از میزان حداقل مجاز کمتر شود و حتی مقادیر منفی نیز به خود بگیرد و با توجه به این‌که دبی‌های خروجی ثابت فرض شده‌اند، جواب‌های حاصل از این نوع تحلیل با واقعیت مطابقت نخواهد داشت. وقتی فشار در گره‌ای کمتر از میزان حداقل مجاز باشد، دبی خروجی از گره کاهش خواهد یافت و دیگر برابر دبی ثابتی که از اول فرض می‌شود، نخواهد بود. بنابراین روش DDSM در شرایط غیرنرمال کارایی خود را از دست می‌دهد. به همین دلیل محققان به این نتیجه رسیده‌اند که در تحلیل شبکه‌های توزیع آب، باید روابط بین فشار در گره‌ها و دبی خروجی از آنها مورد توجه قرار گیرد[9]. به این روش، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار گفته می‌شود.

هم‌چنین در مواردی که محاسبهٔ کمبود فشار و مقدار کاهش آب قابل دسترس در قالب شاخص‌هایی نظیر قابلیت اطمینان مد نظر باشد استفاده از این روش ضروری خواهد بود[1].

مفهوم میانگین سن آب یا متوسط زمان حرکت آب (WA_{ij}) بین گره‌های i و j از همهٔ مخازن تحت شرایط دائمی توسط مالز و همکاران معرفی شده است[11]. ماژول دینامیکی کیفیت آب نرم‌افزار EPANET2 تغییرات سن آب را در شبکه نسبت به زمان مدل می‌کند[12]. در واقع نرم‌افزار مذکور از مقادیر دبی به‌دست آمده از تحلیل هیدرولیکی برای حل معادلهٔ بقای جرم استفاده می‌کند تا زمان حرکت آب را در لوله‌ای که گره i و j را به هم متصل می‌کند را به‌دست آورد. معادلهٔ بقای جرم از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\Delta WA_{ki}}{\Delta t} = -\frac{q_{ki}}{Area_{ki}}\frac{\Delta WA_{ki}}{\Delta x_{ki}} + 1.0 \qquad (۱)$$

که در آن WA_{ki} سن آب در لولهٔ ki می‌باشد که تابعی از فاصله x و زمان t است $\frac{q_{ki}}{Area_{ki}}$. سرعت جریان در لوله ki بوده و عدد یک نیز نشان می‌دهد که در هر واحد زمان، سن آب یک واحد افزایش پیدا می‌کند. معادلهٔ (۱) با داشتن شرط اولیه در زمان صفر و شرط مرزی در ابتدای لوله به شکل رابطهٔ (۲) قابل حل است.

$$W\ A_i\ (0,t) = \sum_k q$$

$$\frac{kiWA_{ki}(L_{ki,t}) + Q_{ext,i}WA_{ext,i}\frac{\Delta WA_{ki}}{\Delta t} = -\frac{q_{ki}}{Area_{ki}}\frac{\Delta WA_{ki}}{\Delta x_{ki}} + 1.0}{\sum_k q_{ki} + Q_{ext,i}} \qquad (۲)$$

که در آن $WA_i(0,t)$ سن آب در گره i ، q_{ki} دبی جریان در لوله‌های ورودی به گره i ، $WA_{ki}(L_{ki,t})$ سن آب در لوله‌های ورودی به گره i با طول L در زمان t، $Q_{ext,i}$ جریان خروجی از گره i و $WA_{ext,i}$ سن آب جریان خروجی می‌باشند.

نرم‌افزار EPANET2 این معادلات را با مدل عددی

المان حجم مجزا (Discrete Volume Element Method, DVEM) حل می‌کند.

مدل بهینه‌سازی

روش بهینه‌سازی به کاررفته در این تحقیق، الگوریتم جامعهٔ مورچگان می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی جامعهٔ مورچگان که با الهام از رفتار اجتماعی مورچه‌ها در هنگام جستجوی غذا توسعه یافته است، به‌عنوان یک روش فراکاوشی توسط دریگو پیشنهاد گردید [13]. استفاده از الگوریتم مورچه‌ها در حل مسائل مهندسی موجود اولین بار توسط ماریانو و مورالز [14] صورت گرفت و مایر و همکاران [15] و [16] برای اولین بار این الگوریتم را برای طراحی شبکه‌های توزیع آب به‌کار بردند. یافته‌ها نشان داد که الگوریتم جامعهٔ مورچگان می‌تواند جایگزین مناسبی برای الگوریتم ژنتیک باشد. زچین و همکاران برای بالا بردن فهم از پارامترهای الگوریتم ACO، آنها را برای شبکه‌های توزیع آب تشریح نمودند[17]. هم‌چنین زچین و همکاران پنج الگوریتم جامعهٔ مورچگان را در طراحی شبکه‌های توزیع آب با هم مقایسه کرده‌اند که این الگوریتم‌ها شامل AS، ACS، EAS،ASrank و MMAS می‌باشند[18]. استفاده از برخی از این روش‌ها مانند (ASrank, MMAS) برای شبکه‌های توزیع آب بسیار موفقیت‌آمیز می‌باشند.

توابع هدف و ساختار آنها. تابع حداقل‌سازی هزینه‌های انرژی پمپاژ در نظر گرفته شده در این پژوهش به‌صورت معادلات زیر است.

$$\text{MinZ} = \sum_{P=1}^{NP}\sum_{t=1}^{NT} \text{EnergyCost}_{pt} \quad (۳)$$

$$(\text{Energy})_{pt} = \frac{Y_w \times Q_{pt} \times H_{pt}}{\eta_{pt}} \times D_{pt} \quad (٤)$$

$$(\text{EnergyCost})_{pt} = (\text{Energy})_{pt} \times ET_t \quad (٥)$$

که در آنها $(\text{EnergyCost})_{pt}$ هزینه انرژی مصرفی پمپ pام در بازهٔ زمانی tام (واحد پول)، $(\text{Energy})_{pt}$ انرژی مصرفی پمپpام در بازه زمانی tام (کیلو وات)، γ_w وزن مخصوص آب (کیلو نیوتن بر مترمکعب)، Q_{pt} دبی خروجی از پمپ p ام در بازهٔ زمانی t ام (متر-مکعب بر ثانیه)، NP تعداد پمپ‌ها، NT تعداد بازه‌های زمانی، H_{pt} هد تأمین شده توسط پمپ pام در بازهٔ زمانیtام (متر آب)، η_{pt} بازده پمپ pام در بازهٔ زمانی tام (درصد)، ET_t تعرفهٔ انرژی الکتریکی در ساعت tام (واحد پول برای هر کیلووات ساعت انرژی مصرفی)، D_{pt} طول بازهٔ زمانیtام (ساعت) می‌باشند.

در این پژوهش تغییر وضعیت پمپ رأس ساعت صورت می‌گیرد، چون در غیر این‌صورت فضای جستجو بسیار وسیع خواهد شد. سرعت چرخش موتور پمپ نیز به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله در نظر گرفته شده است.

روابط قابلیت اطمینان. هنگامی‌که دور پمپ تغییر پیدا می‌کند، فشار و سن آب در گره‌ها نیز دچار تغییر می‌شود. آنگاه می‌توان قابلیت اطمینان گرهی ناشی از تغییر فشار و سن آب را در گره i و در زمان t از روابط زیر محاسبه نمود.

$$r_H(i,t) = \begin{cases} 0 & P(i,t) < P_{min} \\ \dfrac{P(i,t) - P_{min}}{P_{des} - P_{min}} & P_{min} < P(i,t) < P_{des} \\ \dfrac{P(i,t) - P_{max}}{P_{des} - P_{max}} & P_{des} < P(i,t) < P_{max} \\ & P(i,t) > P_{max} \\ 0.25 & \end{cases} \quad (٦)$$

$$r_{WA}(i,t) = \begin{cases} 1 & WA(i,t) < 6 \\ 2.5 - 0.25WA(i,t) & 6 < WA(i,t) < 10 \\ 0 & WA(i,t) > 10 \end{cases} \quad (٧)$$

که در آنها $r_H(i,t)$ قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی در گره i و در زمان t، $P(i,t)$ فشار در گره i و در زمان t، P_{min} فشار مینیمم برابر صفر، P_{des} فشار مطلوب برابر ۳۰ متر و P_{max} فشار ماکزیمم برابر ۱۰۰ متر، $r_{WA}(i,t)$ قابلیت اطمینان سن آب گرهی در گره i و در زمان t و $WA(i,t)$ سن آب در گره i و در زمان t می‌باشند.

آن‌گاه قابلیت اطمینان گرهی در زمان t با متوسط‌گیری روابط فوق نسبت به تقاضای گره‌ها از معادلات زیر به‌دست می‌آید.

$$R_{H,t} = \frac{\sum_{i=1}^{N} r_H(i,t) * Q_{i,t}^{req}}{\sum_{i=1}^{N} Q_{i,t}^{req}} \quad (۸)$$

$$R_{WA,t} = \frac{\sum_{i=1}^{N} r_{WA}(i,t) * Q_{i,t}^{req}}{\sum_{i=1}^{N} Q_{i,t}^{req}} \quad (۹)$$

که در آنها $R_{H,t}$ و $R_{WA,t}$ به‌ترتیب قابلیت اطمینان هیدرولیکی و سن آب گرهی در زمان t هستند که با متوسط‌گیری وزنی نسبت به تقاضای گره‌ها $Q_{i,t}^{req}$ به‌دست آمده‌اند.

در نهایت قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی و سن آب گرهی از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$R_H = \frac{\sum_{t=1}^{25} R_{H,t}}{25} \quad (۱۰)$$

$$R_{WA} = \frac{\sum_{t=1}^{25} R_{WA,t}}{25} \quad (۱۱)$$

که R_H و R_{WA} به‌ترتیب قابلیت اطمینان هیدرولیکی و سن آب گرهی می‌باشند.

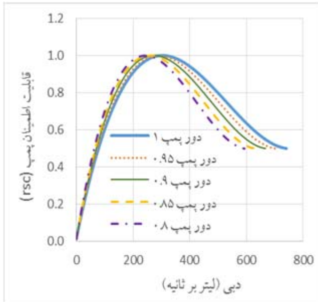
هر پمپ دارای منحنی دبی- هد می‌باشد که نقطهٔ کار پمپ از روی آن مشخص می‌شود و بسته به این‌که نقطهٔ کار پمپ در کدام قسمت منحنی دبی- هد قرار گیرد راندمان پمپ متفاوت خواهد بود. پس از روی منحنی راندمان پمپ می‌توان مقدار قابلیت اطمینان پمپ i در زمان $t[R_{pump}(i,t)]$ را از شکل (۱) به‌دست آورد.

پس از محاسبهٔ قابلیت اطمینان برای هر پمپ و در هر زمان از شکل (۱)، قابلیت اطمینان پمپ در زمان t از معادلهٔ (۱۲) بدست می‌آید.

$$R_{pump}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{3} R_{pump}(i,t)}{3} \quad (۱۲)$$

در نهایت قابلیت اطمینان پمپ از رابطهٔ (۱۳) قابل محاسبه است.

$$R_{pump} = \frac{\sum_{t=1}^{25} R_{pump}(t)}{25} \quad (۱۳)$$



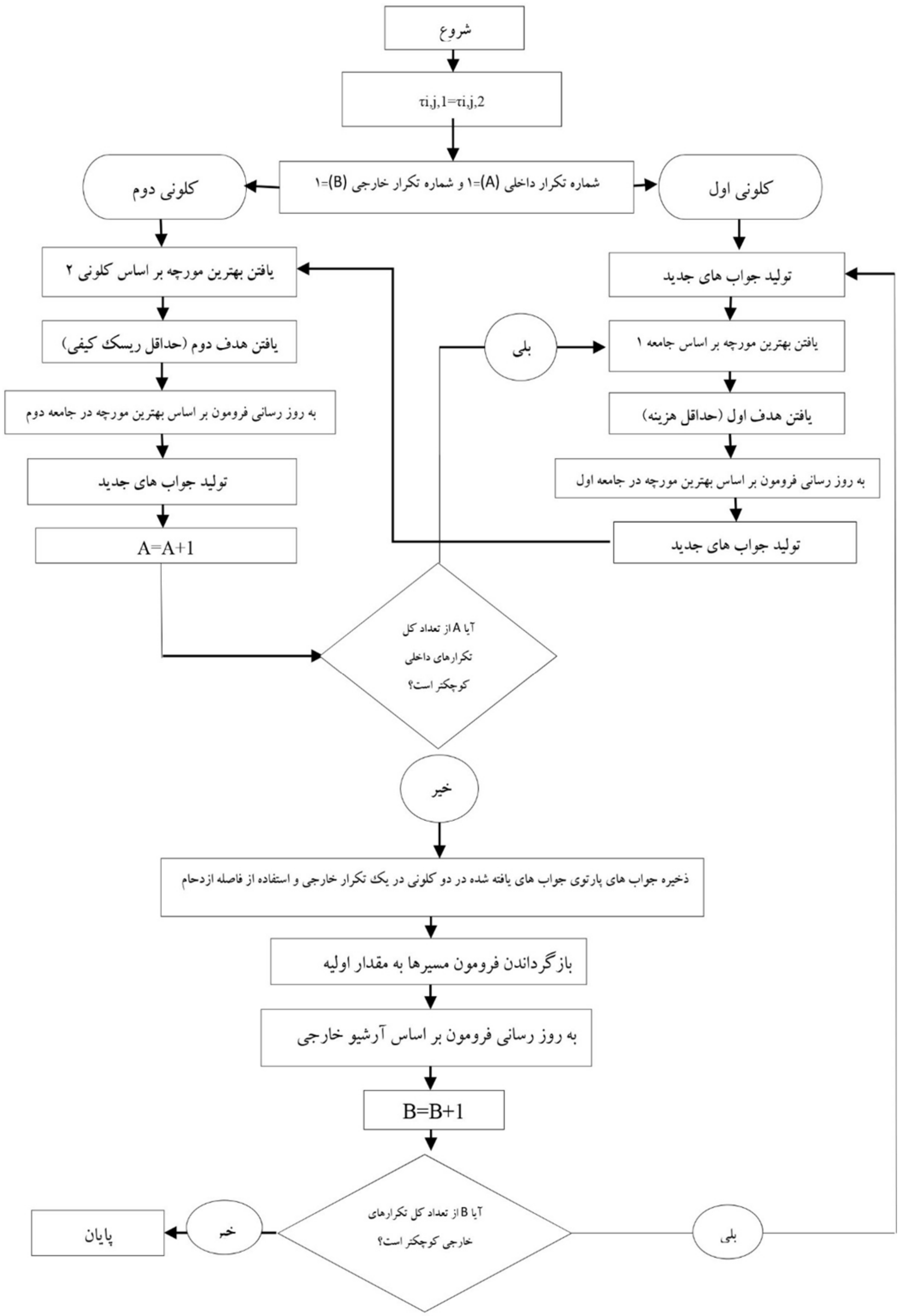
شکل ۱ مقدار قابلیت اطمینان پمپ $R(Pump,t)$ برای دورهای مختلف پمپ

برای محاسبه قابلیت اطمینان تلفیقی، ابتدا قابلیت اطمینان هیدرولیکی و سن آب گرهی به نسبت ۰/۷ و ۰/۳ با توجه به اهمیت بیشتر قابلیت اطمینان هیدرولیکی با هم ترکیب می‌شوند و بعد ترکیب این دو با قابلیت اطمینان پمپ میانگین‌گیری هندسی می‌شود.

$$R_{pump,H,WA} = \frac{\sum_{t=1}^{25} \sqrt{(0.7 * R_{H,t} + 0.3 * R_{WA,t}) * R_{pump}(t)}}{25} \quad (۱٤)$$

که در آن $R_{pump,H,WA}$ قابلیت اطمینان تلفیقی (ترکیب قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی و سن آب) می‌باشد.

برای محاسبهٔ این توابع هدف، مدل هیدرولیکی و کیفی(سن آب) برای هر یک از اعضای جمعیت یک بار به‌صورت دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار EPANET2 تحلیل می‌شود. سپس نتایج خروجی از نرم‌افزار EPANET2 به‌وسیلهٔ الگوریتم جامعهٔ مورچگان که به زبان C++ نوشته شده است، بررسی می‌شود. همچنین ارتباط بین این دو نرم‌افزار توسط برنامه‌ای که به زبان C++ نوشته شده است برقرار می شود. این برنامه مقادیر فشار و سن آب در گره‌های کنترل‌شونده را از نرم‌افزار EPANET2 دریافت می‌کند و وارد الگوریتم جامعه مورچگان می‌کند و خروجی‌های الگوریتم جامعه مورچگان را که همان مقادیر دور پمپ هستند به EPANET2 وارد می‌کند. این کار تا همگرا شدن جواب‌ها به‌سمت جواب بهینه به‌طور مرتب تکرار می‌شود. شکل(۲) الگوریتم این کار را نشان می‌دهد.



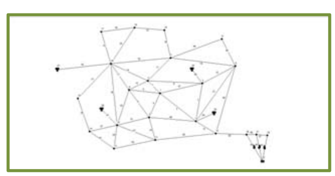
شکل۲ فلوچارت الگوریتم استفاده‌شده برای بهینه‌سازی در این تحقیق بر مبنای مرجع [۱۹]

لازم به ذکر است که منحنی پارتو نموداری را ارائه می‌دهد که شامل نقاط نامغلوب می‌باشد. این نمودار گزینه‌های مختلفی پیش روی تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. هر یک از این گزینه‌ها علاوه بر برخورداری از شرایط بهینگی نسبی از نظر یکی از توابع هدف موجود نسبت به بقیه برتری دارند. به همین دلیل امکان انتخاب تصمیم‌گیرندگان افزایش می‌یابد. ممکن است برخی از بهره برداران مایل باشند یک جواب بهینه را از مجموعه جواب‌های منحنی تعامل انتخاب کنند و آن را مبنای تصمیم‌گیری خود قرار دهند.

برای انتخاب یک نقطهٔ بهینه بر روی منحنی تعامل پارتو روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله یونگ [20]، روش‌های نش (Nash) غیرمتقارن، کالای-سمورودینسکی (Kalai-Smorodinsky) نامتقارن، سطح یکنواخت نامتقارن و افت مساوی نامتقارن [21]. در این مقاله هدف فقط ارائه منحنی تعامل بوده و لذا نسبت به انتخاب نقطهٔ بهینهٔ خاص اقدام نشده است.

ارزیابی روش

شبکه مثال موردی استفاده شده در این مقاله شبکهٔ توزیع آب Anytown است (شکل ۳). این شبکه برای اولین بار توسط والسکی و همکاران [22] ارائه شده که در تأمین تقاضاهای گرهی دچار کمبود بوده است. در مطالعهٔ مورفی و همکاران [23]، با دوتایی کردن بعضی از لوله‌ها و اضافه کردن ۲ تانک شمارهٔ ۲٤ و ۲۷، کمبود فشار موجود در شبکهٔ توزیع برطرف شده است. مشخصات اجزای این شبکه شامل خصوصیات گره‌ها و لوله‌ها، مشخصات پمپ و تانک و نیز ضرایب الگوی تقاضا در مرجع [23] ارائه شده است.

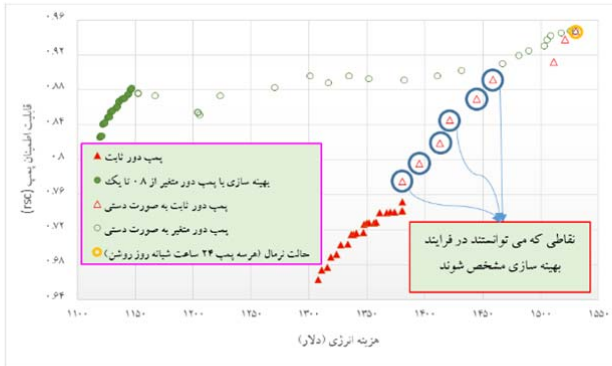


شکل ۳ شمای کلی شبکه توزیع آب Anytown

نتایج و بحث

شبکهٔ توزیع آب Anytown سه پمپ مشابه و به‌صورت موازی دارد که وظیفهٔ تأمین آب مورد نیاز مصرف‌کنندگان را دارا می‌باشند. در این‌جا هر سه پمپ در فرآیند بهینه‌سازی شرکت می‌کنند و برای هر یک از روابط قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی در دو حالت پمپ دور ثابت و پمپ دور متغیر انجام و منحنی تعامل برای هر یک تولید می‌شود. قابل ذکر است با توجه به این‌که پمپ دور متغیر در دورهای پایین پمپ نمی‌تواند هد مورد نیاز شبکه را تأمین کند، پمپ خاموش می‌شود. به همین دلیل برای متغیر تصمیم دور پمپ محدودهٔ ۰/۸ تا یک درنظر گرفته شده است. البته در این محدوده بازهم ممکن است که در برخی زمان‌ها پمپ خاموش شود.

بهینه‌سازی هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان پمپ. در شکل (٤) منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان پمپ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، قابلیت اطمینان پمپ از روی منحنی عملکرد آن تعریف شده است. بدین معنی که هنگامی که نقطهٔ کار پمپ روی منحنی عملکرد در مکانی قرار گیرد که به‌ازای هد و دبی در آن راندمان پمپ حداکثر باشد، آن‌گاه قابلیت اطمینان پمپ نیز حداکثر و برابر یک می‌باشد؛ اما به هر میزان که نقطهٔ کار پمپ روی منحنی عملکرد از نقطه با حداکثر راندمان فاصله بگیرد، از میزان قابلیت اطمینان پمپ نیز کاسته می‌شود. مثلاً اگر به هر دلیلی یکی از پمپ‌های شبکهٔ توزیع خاموش شده و یا این‌که دور پمپ کاهش یابد، آن‌گاه ممکن است پمپ دیگر برای جبران، دبی بالایی را با هد کم تولید نماید که این امر مطلوب نیست و از میزان قابلیت اطمینان پمپ می‌کاهد.
از شکل(٤) نتایج زیر به‌دست می‌آید:



شکل ٤ منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان پمپ

۱- در حالت نرمال که هر سه پمپ ٢٤ ساعت شبانه‌روز روشن باشند، هزینه انرژی برابر ۱۵۳۰ دلار است و قابلیت اطمینان پمپ ۰/۹٤٦ می‌باشد. با توجه به منحنی تعامل به‌دست آمده مشخص است که قابلیت اطمینان پمپ با هزینهٔ کمتر از قابلیت اطمینان حالت نرمال کمتر شده است و این نشان می‌دهد که هنگامی که دور پمپ کاهش می‌یابد، نقطهٔ کار پمپ روی منحنی عملکرد از نقطه با حداکثر راندمان فاصله می‌گیرد.

۲- در شکل نقاط توپر، نقاط به‌دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی می‌باشند و نقاط توخالی نقاطی هستند که به‌صورت دستی محاسبه شده‌اند. در حالت پمپ دور ثابت و دور متغیر نقاط دستی به‌دست آمده در ادامهٔ منحنی‌های تعامل به‌دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی می‌باشند. در حالت پمپ دور متغیر نقاط با قابلیت اطمینان بالاتر نیز وجود دارد، اما از آن‌جایی که این نقاط هزینه خیلی بیشتری را تولید می‌کنند در فرآیند بهینه‌سازی حذف می‌شوند. همین‌طور در حالت پمپ دور ثابت، نقاط دستی به‌دست آمده باید در ادامهٔ منحنی تعامل مشخص می‌شدند. به نظر می‌رسد که فضای بزرگ متغیر تصمیم نمی‌تواند تمامی نقاط منحنی تعامل را به‌خوبی نشان دهد.

۳- هزینهٔ انرژی تابعی از دو عامل مقدار انرژی مصرفی و تعرفهٔ الکتریکی است. برای بهینه‌سازی هزینهٔ انرژی لزوماً نباید کارکرد پمپ را به دورهٔ زمانی با تعرفهٔ الکتریکی کم منتقل نمود، بلکه ترکیبات دور پمپ در ٢٤ ساعت شبانه‌روز باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که مقدار مصرف انرژی کاهش یابد. پس برای کاهش هزینهٔ انرژی لازم است که هم کارکرد پمپ به دورهٔ زمانی تعرفهٔ الکتریکی کم منتقل شود و هم این‌که ترکیبات دور پمپ به‌گونه‌ای انتخاب شوند که میزان مصرف انرژی کاهش یابد.

٤- شیب منحنی تعامل در هر دو حالت پمپ دور ثابت و پمپ دور متغیر بسیار تند است و این نشان می‌دهد که با افزایش اندکی در میزان هزینهٔ انرژی، قابلیت اطمینان پمپ افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد.

بهینه‌سازی هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی. در شکل (۵) منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی نشان داده شده است. نام قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی از این جهت انتخاب شده است که در محاسبهٔ قابلیت اطمینان فقط فشار گره‌ها از رابطهٔ (۸) نقش داشته است.

نکته مهمی که در شکل (۵) مشاهده می‌شود این است که در حالت پمپ دور متغیر نقاط با قابلیت اطمینان بیشتر نیز وجود دارند، ولی به‌علت هزینهٔ خیلی زیاد، از فرآیند بهینه‌سازی حذف شده‌اند. نکتهٔ مهم‌تر، بالاتر بودن قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی در حالت پمپ دور ثابت از قابلیت اطمینان حالت نرمال (برابر ۰/۷۳٦) می‌باشد؛ یعنی حتی با هزینهٔ بیشتر، قابلیت اطمینان در حالت دور ثابت از قابلیت اطمینان حالت

دور متغیر بیشتر شده است.

به‌نظر می‌رسد علت این امر مربوط به تعریف قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی باشد. چون در تعریف قابلیت اطمینان هر اندازه که فشار از فشار مورد نیاز کمتر و یا بیشتر شود، از میزان قابلیت اطمینان کاسته می‌شود.

بهینه‌سازی هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان سن آب گره‌ای. در شکل (٦) منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان سن آب از رابطهٔ (٥) نشان داده شده است. هر چه‌قدر دور پمپ کاهش داده شود، با توجه به کم شدن دبی و در نتیجه کاهش سرعت آب در لوله‌ها باید قابلیت اطمینان سن آب نیز کاهش یابد. اما شکل (٦) عکس این مطلب را نشان می‌دهد. در این شکل با کاهش دور پمپ قابلیت اطمینان، سن آب افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد که علت این امر به‌دلیل تأثیر پمپ دور متغیر بر تانک‌های شبکه باشد. چون با کاهش دور پمپ، آب کمتری در تانک‌های شبکه ذخیره می‌شود و در نتیجه سن آب بهبود می‌یابد.

نکتهٔ مهم دیگر در این شکل این است که ثابت ماندن قابلیت اطمینان سن آب در منحنی تعامل در حالت دور متغیر، دلیل بر این نیست که تغییر دور پمپ، تأثیری بر روی سن آب ندارد.

بهینه‌سازی هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان تلفیقی. در شکل (٧) منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان تلفیقی نشان داده شده است. برای قابلیت اطمینان تلفیقی از رابطهٔ (١٢) استفاده شده است.

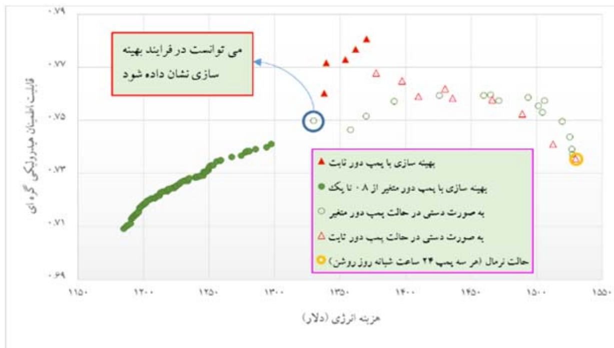
در جدول (١) داده‌های بهینه دور هر سه پمپ برای نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان روی منحنی تعامل در حالت پمپ دور متغیر ارائه شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، در برخی از زمان‌ها هرچند مقداری برای دور هر یک از پمپ‌ها تعیین شده است، ولی با توجه به این‌که پمپ نمی‌تواند هد مورد نیاز را عبور دهد پمپ خاموش شده است.

جدول ١ میزان بهینهٔ دور پمپ برای نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان روی منحنی تعامل در حالت پمپ دور متغیر

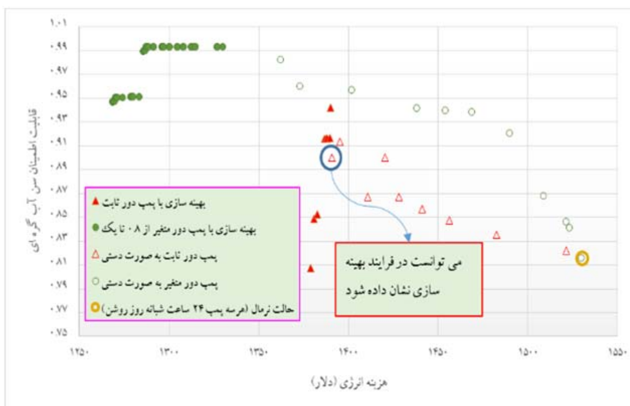
زمان (ساعت)	دور پمپ شماره ٥٩	دور پمپ شماره ٦٠	دور پمپ شماره ٦١
٠	٠/٩٩	١	٠/٩٩
١	٠/٩٥	٠/٩٦	١
٢	(پمپ خاموش) ٠/٨٤	٠/٨٨	(پمپ خاموش) ٠/٨٧
٣	(پمپ خاموش) ٠/٨٣	٠/٩٧	٠/٩٤
٤	٠/٩٩	٠/٩٦	٠/٩٧
٥	٠/٩٧	٠/٩٢*	٠/٩٣
٦	٠/٩٧	(پمپ خاموش) ٠/٨٩	٠/٩٨
٧	(پمپ خاموش) ٠/٨٣	(پمپ خاموش) ٠/٨٢	٠/٨٩
٨	٠/٩١	٠/٨٦	٠/٩٠
٩	(پمپ خاموش) ٠/٨٥	١	٠/٩٧
١٠	٠/٩٧	٠/٩٣	٠/٩٨
١١	٠/٩٤	٠/٩٣	٠/٩٦
١٢	٠/٨٩	٠/٨٦	٠/٨٦
١٣	٠/٩٥	٠/٩٢	٠/٩١
١٤	٠/٨٤	٠/٨٩	٠/٨٩
١٥	٠/٩٣	(پمپ خاموش) ٠/٨٠	٠/٨٦
١٦	٠/٩٠	٠/٨٥	٠/٩٠
١٧	٠/٨٢	٠/٨٢	٠/٨٧
١٨	(پمپ خاموش) ٠/٨١	٠/٩٤	٠/٩٦
١٩	٠/٩٨	٠/٩٧	٠/٩٦
٢٠	٠/٨٧	٠/٨٩	٠/٨٧
٢١	١	١	٠/٩٦
٢٢	٠/٩٢	(پمپ خاموش) ٠/٨٧	٠/٨٩
٢٣	(پمپ خاموش) ٠/٨١	٠/٩١	٠/٩٢
٢٤	٠/٩٩	١	٠/٩٩

* در این زمان پمپ خاموش نشده است، ولی دبی کمی را از خود عبور می‌دهد.

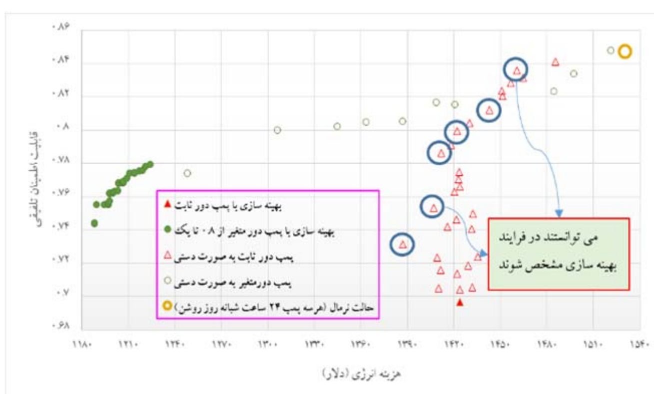
در نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان، هزینهٔ انرژی ۱۲۲٤ دلار و قابلیت اطمینان تلفیقی برابر ۰/۷۸ به‌دست آمده است. در این نقطه قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی گرهی و سن آب گرهی به‌ترتیب ۰/۸۲، ۰/٦٨ و ۰/۹۱ می‌باشد که این مقادیر قابلیت اطمینان نسبت به مقادیر قابلیت اطمینان به‌دست آمده در حالت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان جداگانه کمتر است.



شکل ۵ منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی



شکل ٦ منحنی تعامل بین هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان سن آب گرهی



شکل ۷ منحنی تعامل هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان تلفیقی (قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی و سن آب)

مقایسه مقادیر قابلیت اطمینان. در جدول (۲) برای دو نقطه منحنی تعامل یکی نقطه با قابلیت اطمینان کمتر و دیگری نقطه با قابلیت اطمینان بیشتر، مقادیر بهینهٔ دور پمپ به‌دست آمده استخراج شده است. به‌ازای این مقادیر بهینه، مقادیر انواع قابلیت اطمینان درنظرگرفته شده محاسبه و مقایسه می‌شوند. به‌عنوان نمونه در جدول (۲)، بهینه‌سازی پمپ دور متغیر در حالت قابلیت اطمینان تلفیقی به هزینهٔ ۱۲۲٤/۱۵ دلار و قابلیت اطمینان ۰/۷۷۹۳ رسیده است، درحالی‌که هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان تلفیقی محاسبه شده با داده‌های بهینهٔ به‌دست آمده با قابلیت اطمینان پمپ به‌ترتیب برابر ۱۱٤۷/۲۹ دلار و ۰/۷۸٦۱ می‌باشند. این نشان می‌دهد که در حالت استفاده از داده‌های بهینه قابلیت اطمینان پمپ، هزینهٔ انرژی کمتر و قابلیت اطمینان تلفیقی بیشتر شده است. با این وجود درست است که در نقطهٔ بهینه برای قابلیت اطمینان پمپ، با هزینهٔ کمتر قابلیت اطمینان تلفیقی بیشتر شده است، ولی قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی کمتر شده است. در واقع افزایش قابلیت اطمینان پمپ و سن آب گرهی باعث افزایش قابلیت اطمینان تلفیقی گردیده است. به‌نظر می‌رسد که قابلیت اطمینان تلفیقی نمی‌تواند به ترکیبی از دور پمپ که در آن هر سه قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی گرهی و سن آب گرهی بالا باشند دست یابد. در واقع هنگامی‌که قابلیت اطمینان تلفیقی در فرآیند بهینه‌سازی قرار می‌گیرد، برنامه تلاش می‌کند که هر سه قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی و سن آب را به میزان نسبتاً یکسانی از مقادیر حداکثرشان (مقدار حداکثر قابلیت اطمینان وقتی که هر سه قابلیت اطمینان به تنهایی در فرآیند بهینه‌سازی شرکت می‌کنند) کاهش دهد.

به‌دلیل عدم انجام کار مشابه با روش این مقاله به‌صورت بهینه‌سازی دوهدفه، نتایج جدول (۲) به‌طور کامل قابل مقایسه با دیگر مراجع نیست. اما هاشمی [٥] در تحقیق خود به‌صورت بهینه‌سازی تک‌هدفه حداقل کردن هزینه‌های انرژی با استفاده از پمپ دور متغیر توانست میزان انرژی مصرفی در شبکهٔ توزیع آب Anytown را برابر با ۱۷۱٤۹ کیلو وات به‌دست آورد که به‌میزان ۱۵/۳ درصد نسبت به تحقیق مورفی و همکاران [۲۳] کاهش نشان می دهد. در مطالعهٔ مهزاد [٦] نشان داده شده است که با این هزینه کمترین میزان قابلیت اطمینان پمپاژ در شبکه به میزان ۰/۷۰۲ به‌دست خواهد آمد. در این مقاله کمترین هزینهٔ انرژی از جدول ۲ برای بهینه‌سازی قابلیت اطمینان پمپ در حالت پمپ دور متغیر برابر ۱۱۱۹/۵۹ دلار به‌دست آمده است که معادل ١٦٨٦٤ کیلو وات می‌باشد و بنابراین هزینه‌های انرژی در این مطالعه به‌اندازهٔ ۱/٦٦ درصد کاهش بیشتری را نسبت به هاشمی [٥] نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی هزینهٔ انرژی و قابلیت اطمینان هیدرولیکی، کیفی و تلفیقی (تلفیق قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی) با استفاده از پمپ دور ثابت و دور متغیر برای شبکهٔ توزیع آب Anytown مورد بررسی قرار گرفت. هزینهٔ انرژی تابعی از دو عامل میزان انرژی مصرفی و میزان تعرفه الکتریکی می‌باشد و در واقع ترکیب این دو عامل می‌تواند هزینه انرژی را کاهش دهد.

نکتهٔ مهمی که در پمپ دورمتغیر وجود دارد این است که چون پمپ نمی‌تواند به‌ازای برخی از دورهای پمپ هد مورد نیاز شبکه را تأمین نماید (در واقع نقطهٔ کار مورد نیاز برای پمپ روی منحنی عملکرد آن دور پمپ وجود ندارد)، پمپ خاموش می‌شود.

در این مقاله دو تعریف مجزا برای قابلیت اطمینان هیدرولیکی انجام شد، یکی قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی که میزان برآورده شدن فشار مورد نیاز در گره‌ها برای تأمین آب مورد نیاز مصرف کنندگان را نشان می‌دهد و دیگری تعریف جدیدی از قابلیت اطمینان پمپ براساس منحنی عملکرد و راندمان پمپ‌های

شبکهٔ توزیع آب که بیان می‌کند نقطهٔ کار پمپ از نقطه با راندمان حداکثر چه‌قدر فاصله گرفته است.

سن آب در گره‌ها هم به‌عنوان قابلیت اطمینان کیفی درنظر گرفته شده است. درنهایت قابلیت اطمینان تلفیقی به‌صورت ترکیب سه قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی گره‌ای و سن آب گرهی تعریف شده است.

جدول ۲ مقایسهٔ مقادیر هزینهٔ انرژی و انواع قابلیت اطمینان درنظر گرفته شده در این پژوهش

نتایج بهینه‌سازی			هزینه (دلار)	قابلیت اطمینان پمپ	قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای	قابلیت اطمینان سن آب گره‌ای	قابلیت اطمینان تلفیقی
محاسبه قابلیت اطمینان با نتایج بهینه‌سازی							
بهینه سازی با قابلیت اطمینان پمپ	پمپ دور ثابت	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۴۵۵/۶۵	۰/۸۸۲۸	۰/۷۵۲۹	۰/۷۱۲۴	۰/۷۹۲۳
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۳۰۷/۷۷	۰/۶۶۲۶	۰/۷۵۶۵	۰/۷۴۱۵	۰/۶۸۵۲
	پمپ دور متغیر	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۱۴۷/۲۹	۰/۸۸۱۴	۰/۶۲۰۳	۰/۹۳۳۳	۰/۷۸۶۱
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۱۱۹/۵۹	۰/۸۲۵۳	۰/۶۰۸۹	۰/۹۳۷۴	۰/۷۵۳۴
بهینه سازی با قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای	پمپ دور ثابت	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۳۷۰/۱۵	۰/۶۳۷۲	۰/۷۸۰۷	۰/۸۵۶۲	۰/۶۹۸۸
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۳۳۷/۹۴	۰/۵۷۷۰	۰/۷۶۰۳	۰/۷۵۱۴	۰/۶۳۸۸
	پمپ دور متغیر	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۲۹۸/۱۱	۰/۷۴۷۷	۰/۷۴۰۸	۰/۹۰۶۶	۰/۷۵۶۵
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۱۸۵/۴۸	۰/۷۰۸۸	۰/۷۰۱۴	۰/۹۱۲۳	۰/۷۲۴۹
بهینه سازی با قابلیت اطمینان سن آب گره‌ای	پمپ دور ثابت	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۳۹۰/۱۵	۰/۶۰۶۵	۰/۷۵۶۷	۰/۹۴۲۲	۰/۶۹۰۳
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۳۶۴/۷۹	۰/۶۴۱۶	۰/۷۶۳۳	۰/۷۹۷۵	۰/۶۹۵۳
	پمپ دور متغیر	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۳۳۰/۰۵	۰/۷۰۴۴	۰/۶۷۰۹	۰/۹۹۳۱	۰/۷۲۶۲
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۲۶۸/۵۵	۰/۶۸۵۰	۰/۶۷۷۵	۰/۹۴۶۸	۰/۷۰۷۵
بهینه سازی با قابلیت اطمینان تلفیقی	پمپ دور ثابت	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۴۶۰/۵۹	۰/۹۰۳۵	۰/۷۴۶۱	۰/۸۴۵۶	۰/۸۳۶۰
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۳۸۶/۹۴	۰/۷۰۴۴	۰/۷۵۸۲	۰/۸۱۱۱	۰/۷۳۱۲
	پمپ دور متغیر	نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان	۱۲۲۴/۱۵	۰/۸۲۳۷	۰/۶۸۱۰	۰/۹۰۹۴	۰/۷۷۹۳
		نقطه با کمترین قابلیت اطمینان	۱۱۸۸/۱۹	۰/۷۷۱۶	۰/۶۷۷۶	۰/۸۵۸۰	۰/۷۴۳۸

هنگامی که قابلیت اطمینان تلفیقی به‌عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد، برنامه تلاش می‌کند که هر سه نوع قابلیت اطمینان را به اندازهٔ نسبتاً یکسان افزایش دهد. در این حالت بازهم مقدار هر نوع قابلیت اطمینان کمتر از وقتی است که به‌تنهایی در فرآیند بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیبی از دور پمپ که هرسه نوع قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی گرهی و سن آب گرهی را هم‌زمان افزایش دهد وجود ندارد.

مراجع

1. Atkinson, R., Van Zyl, J. E., Walters, G. A., Savic, D. A., "Genetic Algorithm Optimization of Level-Controlled Pumping Station Operation", *In Proceeding of Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, Centre for Water Systems, Exeter, U.K., pp.79–90, (2000).

2. Savic, D.A., Walters, G.A., Schwab, M., "Multiobjective Genetic Algorithms for Pump Scheduling in Water Supply", *Evolutionary Computing, AISB Workshop*, 1305,227-236, DOI:10.1007/BFb0027177, (1997).

3. Lopez-Ibanez, M., Prasad, T. D., Paechter, B., "Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No 134(4), pp. 337-346, (2008).

4.Wood, D. J., Reddy, L. S., "Using Variable Speed Pumps to Reduce Leakage and Improve Performance", *In Proceedings of "Short Courses on Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*, (Eds. E. Cabrera and A.F. Vela.), Valencia, Spain, 1, pp.145-169. (1994).

۵. هاشمی، س.س.، «بهینه‌سازی شبکه‌های آب با حداقل سازی انرژی پمپاژ» پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران. (۱۳۸۹).

٦. مهزاد، ن.، "بهینه سازی چندهدفه بهره‌برداری از شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن تأثیرات پمپ و مخزن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران. (۱۳۹۰).

7. Farmani, R., Walters, G. and Savic, D., "Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality". *Journal of Hydroinformatics*, No 8 (3), pp. 165-179. (2006).

8. Todini, E.,"Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Heuristic Approach", *Urban Water*, No 2 (3), pp.115–122. (2000).

9. Tabesh, M., Tanyimboh, T. T., Burrows, R,"Head Driven Simulation of Water Supply Networks", *International Journal of Engineering*, Transactions A: Basics, No 15 (1), pp.11-22. (2002).

10. Tabesh, M., "Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems", PhD Thesis, *Department of Civil Engineering, University of Liverpool*, England, (1998).

11. Males, R. M., Clark, R. M., Wehrman, P. J. & Gates, W. E., "Algorithm for mixing problems in water

systems",*Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, No 111 (2), pp. 206–219, (1985).

12.Rossman, L.A., "EPANET2 Users Manual", *US Environmental Protection Agency*. Cincinnati, OH., (2000).

13. Dorigo, M., "Optimization, learning and natural algorithms", *Ph.D. Thesis*, Politecnico di Milano, Milan, Italy, (1992).

14. Mariano, C.E. and Morales, E., "A multiple objective ant-Q algorithm for the design of water distribution irrigation networks", *Proceedings of First International Workshop on Ant Colony Optimization ANTS*, Brussels, Belgium, (1998).

15. Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y. and Tan, C.L.,"Ant Colony optimization for the design of water distribution systems", *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, ASCE,The Rosen Plaza Hotel, Orlando, Florida, United States, (2001).

16. Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y. and Tan, C.L., "Ant colony optimization for design of water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No 129(3), pp.200-209, (2003).

17. Zecchin, A.C., Maier, H.R., Simpson, A.R., Leonard, M. and Nixon, J.B., "Parametric Study for an Ant Algorithm Applied to Water Distribution System Optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, No 9(2), pp.175-191, (2005).

18. Zecchin, A.C., Maier, H.R., Simpson, A.R., Leonard, M. and Nixon, J.B., "Ant colony optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No 133(1), pp. 87-92, (2007).

19. Afshar, A., Sharifi, F., Jalali, M. R., "Non-Dominated Archiving Multi-Colony Ant Algorithm for Multi-Objective Optimization: Application to Multi-Purpose Reservoir Operation", *Engineering Optimization*, No 41(4), pp. 313-325, (2009).

20. Young, H. P., "An Evolutionary Model of Bargaining", *Journal of Economic Theory*, No 59(1), pp. 145-168, (1993).

21. Salazar, R., Szidarovszky, F., Coppola, Jr. E., Rojano, A., “Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico”, *Journal of Environmental Management*, No 84(4), pp.560–71, (2007).

22. Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, L. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee H. L., Leibman, J. C., Mays, L., Moegan, D. R., and Ormsbee, L., "Battle of the Network Models: Epilogue", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, No 113(2), pp. 191-203, (1987).

23. Murphy, L. J., Dandy, G. C., Simpson, A. R., "Optimum Design And Operation Of Pumped Water Distribution Systems", *Proceeding Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Institution of Engineers,Brisbane, Australia, pp. 149–155, (1994).

24. Salazar, R., Szidarovszky, F., Coppola, Jr. E., Rojano, A., “Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico”, *Journal of Environmental Management*, No 84(4), pp. 560–71, (2007).